

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИШМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

26.10.2022 № 11504/01-2171.1-535

На № \_\_\_\_\_

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки «Институт проблем  
механики им. А.Ю. Ишлинского  
Российской академии наук»,  
д. ф.-м. н., член-корреспондент РАН

  
Якуш С. Е.

« 26 » октября 2022г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
о диссертационной работе **Загвозкина Тимофея Николаевича**  
«Неустойчивости и нелинейные режимы течения в гетерогенных средах при  
наличии внешнего потока», представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) –  
«Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Загвозкина Т.Н. посвящена численному  
исследованию гидродинамических процессов, протекающих в многофазных  
гетерогенных системах с широким диапазоном градиентов концентраций и  
определением границы раздела фаз.

**Актуальность темы** объясняется тем, что неоднородные по составу  
вещества встречаются повсеместно, как в технологических процессах, так и в  
природе.

Движение капель в системах смешивающихся жидкостей за счет сил  
плавучести представляет большой практический и теоретический интерес, что,  
в частности, мотивируется важностью сил поверхностного натяжения в  
определении формы и динамики капли, движущейся в окружающей среде.

Тепловая конвекция в пористых средах представляет интерес как для прикладных задач, связанных с технологическими и природными процессами (например, фильтрация, охлаждение реакторов, добыча углеводородов и т.д.), так и с фундаментальной точки зрения.

### **Оценка содержания диссертации.**

Текст диссертации содержит 102 страницы, включая 38 рисунков, состоит из введения, двух глав, заключения и списка 138 источников литературы. Работа характеризуется полнотой и завершенностью. Наличие только двух глав диссертации – не является недостатком, поскольку в двух главах текста диссертации представлен большой объем работы, который можно было бы структурировать на 3-4 самостоятельные главы.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, продемонстрированы научная новизна и достоверность результатов, описана их практическая и теоретическая значимость.

**Глава 1** посвящена исследованию поведения границ раздела в двухфазных системах смешивающихся жидкостей методом фазового поля.

**В разделе 1.1** приводится литературный обзор, в котором описывается история развития теории фазового поля, дается детальное описание данной теории, обосновываются ее преимущества по сравнению с другими подходами.

**В разделе 1.2** методом фазового поля, путем решения полных нелинейных уравнений гидродинамики двухфазной бинарной смеси исследуются возникновение и нелинейное развитие неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Холмбое с учетом влияния межфазных напряжений и диффузионных эффектов для широкого диапазона градиентов концентрации на межфазной границе.

**Раздел 1.3** посвящен прямому численному моделированию процесса всплытия капель смешивающихся с окружающей жидкостью при различных значениях сил поверхностного натяжения.

**Глава 2** посвящена исследованию конвекции в слое пористой среды, насыщенной вязкой несжимаемой жидкостью.

**В разделе 2.1** приводится литературный обзор, в котором описывается состояние исследований конвекции в пористых средах. Приводится обоснование постановки и актуальность задач, рассматриваемых в главе 2 диссертации.

**В разделе 2.2** описываются результаты линейного анализа устойчивости основного состояния, соответствующего режиму однородного прокачивания, на основе уравнений в длинноволновом приближении.

**В разделе 2.3** приводятся результаты прямого численного моделирования на основе полных нелинейных уравнений, описывающих поведение системы.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты исследований и определены перспективы дальнейшей разработки темы.

**Достоверность результатов** численных расчетов обеспечена хорошим соответствием результатов расчетов аналитическим формулам и данным физических экспериментов, анализом сходимости полученных данных при изменении шага расчетной сетки, и удовлетворительным согласием результатов моделирования всплытия капли с использованием двух методов: фазового поля и обычного решения уравнений Навье-Стокса для однофазной двухкомпонентной модели без учёта сил поверхностного натяжения.

#### **Научная новизна работы:**

1. С учетом капиллярных эффектов исследованы неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Холмбое в системах смешивающихся жидкостей,

находящихся в начальный момент времени в неравновесном термодинамическом состоянии. Обнаружено, что увеличение поверхностного натяжения приводит к появлению области устойчивости между областями неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и Холмбое, что связано со стабилизацией неустойчивости Холмбое.

2. В рамках теории фазового поля выполнено прямое численное моделирование всплывания капли в другой жидкости, смешивающейся с жидкостью капли. Показано, что метод фазового поля позволяет моделировать поверхностные эффекты на границе раздела смешивающихся жидкостей, что не удается с помощью других методов. Обнаружено, что при малом поверхностном натяжении, как и в классическом подходе, пренебрегающем поверхностным натяжением, на коротких гидродинамических временных масштабах происходит перемешивание жидкостей и «растворение» капли. При конечном поверхностном натяжении оно играет определяющую роль в динамике капли, являясь более существенным фактором, чем межфазная диффузия.

3. Исследована динамика локализованных конвективных структур в горизонтальном слое пористой среды, насыщенной жидкостью, при наличии неоднородного потока тепла на границах и прокачивания жидкости вдоль слоя. Найдено, что при повышении разности значений теплового потока в области локального максимума нагрева и вне ее, критическое значение скорости, необходимой для исчезновения конвективных структур, увеличивается.

**Практическая значимость работы.** Результаты, полученные при решении задачи о возникновении и развитии неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Холмбое, могут быть использованы в практических приложениях, связанных со смешиванием в системах жидкость/жидкость или газ/жидкость, эти процессы могут быть интенсифицированы за счет гидродинамических неустойчивостей, вызванных сдвиговыми потоками.

Движение капель в системах смешивающихся жидкостей за счет сил плавучести представляет большой практический и теоретический интерес, например, для процессов масляной флотации, как одного из методов обогащения полезных ископаемых. Результаты изучения процессов динамики локализованных конвективных структур в пористой среде могут иметь практическое значение для процессов вытеснения одной жидкости другой, что, например, встречается при добыче углеводородов или в задачах предотвращения перегрева трубопроводов.

**Диссертация прошла необходимую апробацию.** Результаты исследований были представлены на конференциях всероссийского и международного уровней. Полученные результаты опубликованы в 13 работах, включая 4 статьи в журналах из списка ВАК (индексированы в WOS/SCOPUS).

**По содержанию диссертационной работы имеются замечания:**

1. Работа посвящена исследованию течения многофазной системы жидкостей с учётом поверхностных сил на границе раздела фаз, методом фазового поля, однако в обзоре литературы не отражены работы, посвященные другим известным методам с учётом границы раздела фаз, например, VOF метод и работа Brackbill J.U., Kothe D. B. and Zemach C. A. Continuum method for modeling surface tension. 1992. J. Comp. Phys. 100 335–354.
2. Выбор масштаба химического потенциала, а также параметра  $M$  для многофазных систем в диссертационной работе не описан.
3. Безразмерным числом Грасгофа принято называть отношение подъёмных сил к силам трения, но в диссертации в модели метода фазового поля числом Грасгофа названо произведение: отношения плотностей на отношение между силой инерции и силой тяжести, последнее принято называть числом Фруда.

4. Сравнение результатов моделирования задачи о всплытии капли, полученных двумя методами (классическим и методом фазового поля), проведено не совсем для идентичных условий. Хорошо бы уточнить эти условия.
5. В работе не говорится о консервативности численной конечно-разностной схемы и вкладе численной диффузии на полученные результаты численного моделирования, например, в задаче о динамике «растворения» капли.
6. В диссертационной работе используется термин «вымывание» (конвективных структур), который четко не определён и не формализован.
7. Пропущена ссылка на граничные условия: на стр.46 в фразе «...а условия для концентрации будут отражать...» необходимо нависать: «...а условия для концентрации (28-31) будут отражать...»

### **Заключение.**

Диссертационная работа Загвозкина Т.Н. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области численного исследования динамики границ раздела многофазных жидких систем.

Сделанные по работе замечания не снижают общей научной значимости и практической ценности полученных в работе результатов. Диссертационная работа Загвозкина Т.Н. выполнена на достаточно высоком научном уровне и представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области численного исследования динамики границ раздела многофазных жидких систем.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация «Неустойчивости и нелинейные режимы течения в гетерогенных средах при наличии внешнего потока» удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертационным работам, а её автор, Загвозкин Т.Н., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа была доложена автором на научном семинаре лаборатории «Механики сложных жидкостей» ИПМех РАН "Прикладная механика сплошных сред" (руководитель: д.ф.-м.н. Рожков А.Н.) 20.10.2022 г. Результаты и отзыв были обсуждены и одобрены участниками данного семинара, а диссертационная работы Загвозкина Т.Н. рекомендована для защиты.

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории «Механики сложных жидкостей» Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН Федюшкиным Алексеем Ивановичем.

Старший научный сотрудник  
лаборатории «Механики сложных жидкостей»,  
ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
к.ф.-м.н.

Федюшкин А.И.

119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1,  
тел. +7(495)433 34 97  
E-mail: fai@ipmnet.ru

Подпись Федюшкина А.И. подтверждаю:  
Ученый секретарь  
ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
к.ф.-м.н.



Котов М.А.

26.10.2022